



Одночастотные кольцевые полупроводниковые лазеры с волоконным резонатором и их применение

В. П. Дураев, С. В. Медведев, С. А. Воронченко
Акционерное общество «Новая лазерная техника»,
Москва, Россия

Представлены результаты исследований перестраиваемых одночастотных кольцевых полупроводниковых лазеров на длине волны 1550 и 1650 нм с волоконным резонатором. Изложены принципы конструирования кольцевых полупроводниковых лазеров с волоконным резонатором с сохранением поляризации и без сохранения поляризации. Обоснован одночастотный режим работы и перестройки длины волны полупроводникового кольцевого лазера. Обсуждаются основные характеристики полупроводниковых кольцевых лазеров и области их применения.

Ключевые слова: полупроводниковый кольцевой лазер, согласование лазерного диода со световодом, оптические линии связи, диодная лазерная спектроскопия (DLS)

Статья получена: 14.05.2020
Принята к публикации: 11.06.2020

ВВЕДЕНИЕ

Основой полупроводникового кольцевого лазера (ПКЛ) [1] является полупроводниковый оптический усилитель (ПОУ) бегущей волны. В его конструкции в качестве резонатора используется замкнутое кольцо оптическое волокно с сохранением поляризации или без сохранения поляризации. Активным элементом ПОУ, а соответственно и у ПКЛ, служит суперлюминесцентный излучатель (СЛД) [2].

Полупроводниковые кольцевые лазеры представляют особый интерес тем, что обладают относительно дешевой изготовлением и могут быть

Single-Frequency Ring Semiconductor Lasers With a Fiber Cavity and Their Application

V. P. Duraev, S. V. Medvedev, S. A. Voronchenko
New Laser Technology Joint Stock Company, Moscow, Russia

The results of studies of tunable single-frequency ring semiconductor lasers at a wavelength of 1550 and 1650 nm with a fiber cavity are presented. The principles of designing ring semiconductor lasers with a fiber cavity with conservation of polarization and without conservation of polarization are stated. The single-frequency operation and tuning of the wavelength of a semiconductor ring laser is substantiated. The main characteristics of semiconductor ring lasers and their applications are discussed.

Keywords: semiconductor ring laser, matching a laser diode to a fiber, optical communication lines, diode laser spectroscopy (DLS)

Received on: 14.05.2020

Accepted on: 11.06.2020.

INTRODUCTION

The basis of a semiconductor ring laser (SRL) [1] is a semiconductor optical amplifier (SOA) of a traveling wave. In its design, a ring-locked optical fiber with or without polarization conservation is used as a cavity. The superluminescent emitter (SLE) serves as an active element of the SOA, and, accordingly, in SRL [2].

Semiconductor ring lasers are of particular interest in that they are relatively inexpensive to manufacture and can be used in many fields of science and technology. In particular, in optical communication lines, in optical information processing devices [3], in high-resolution spectroscopy [4], in navigation systems, in gyroscopy, as a master oscillator in radiofrequency and microwave generators and in many other devices [5].

One of the important differences between SRLs with a fiber cavity and other lasers is the ability to incorporate a wide range of optical devices and components into the cavity. The design of the SRL allows the use of

использованы во многих отраслях науки и техники. В частности в оптических линиях связи, в устройствах оптической обработки информации [3], в спектроскопии высокого разрешения [4], в навигационных системах, в гироскопии, в качестве задающего генератора в ВЧ и СВЧ генераторах и во многих других устройствах [5].

Одним из важных отличий ПКЛ с волоконным резонатором от других лазеров является возможность встраивать в резонатор широкий спектр оптических устройств и компонентов. Конструкция ПКЛ позволяет использовать волоконный резонатор произвольной длины от нескольких сантиметров до десятков и даже сотен километров. Именно благодаря этим возможностям созданы ПКЛ со сверхдлинными резонаторами.

В резонаторе ПКЛ может осуществляться, в отличие от линейных лазеров, как режим стоящей волны, так и режим бегущей волны. В ПКЛ одновременно могут существовать две волны, распространяющиеся навстречу друг другу в резонаторе. Это свойство позволяет использовать ПКЛ как основу для создания лазерного гироскопа с использованием эффекта Саньяка [6].

В последние годы в области волоконной техники были достигнуты значительные успехи в получении одномодовых оптических волокон, в освоении технологии сварки, в создании оптического волокна с сохранением поляризации, волоконно-оптических изоляторов, элементной базы (волоконных ответвителей, поляризаторов, электрооптических модуляторов и т.п.). Это дало возможность всерьез рассматривать создание на базе полупроводникового кольцевого лазера многих оптических приборов.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

Общий вид и элементы конструкции ПКЛ представлены на рис. 1. Для изготовления активного элемента ПКЛ в работе использовали эпитаксиальные структуры на основе InGaAsP/InP (длина волны излучения 1550, 1650 нм) с квантово-размерными слоями, изготовленные методом МОС-гидридной эпитаксии.

Активный элемент ПКЛ имел длину резонатора 1200–1600 мкм, а ширина активного поло-

а fiber cavity of arbitrary length from a few centimeters to tens or even hundreds of kilometers. It is thanks to these possibilities that SRLs with ultra-long cavities are created.

In contrast to linear lasers, SRL can be carried out in the SRL cavity, both the standing wave mode and the traveling wave mode. In SRL, two waves can simultaneously exist, propagating towards each other in the cavity. This property allows us to use SRL as the basis for creating a laser gyroscope using the Sagnac effect [6].

In recent years, in the field of fiber technology, significant success has been achieved in the production of single-mode optical fibers, in the development of welding technology, the creation of optical fibers with the preservation of polarization, fiber optic insulators, element base (fiber couplers, polarizers, electro-optical modulators, etc.). This made it possible to seriously consider the creation of many optical devices based on a semiconductor ring laser.

EXPERIMENTAL PART

General view and design elements of the SRL are presented in Fig. 1. To fabricate the active SRL element, we used InGaAsP/InP based epitaxial structures (radiation wavelength 1550, 1650 nm) with quantum-well layers fabricated by the method of MOS-hydride epitaxy.

The active element of the SRL had a cavity length of 1200–1600 μm , and the width of the active strip was 3 μm . To reduce back reflections, the front and rear

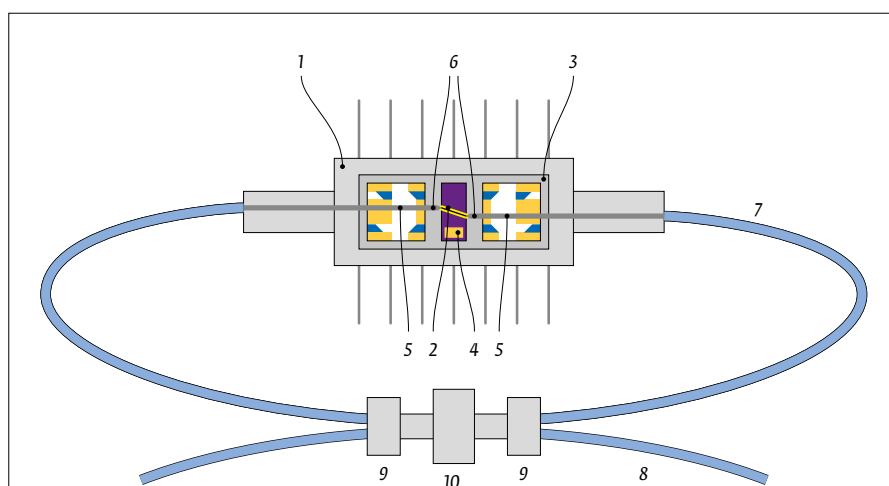


Рис. 1. Схема ПКЛ: 1 – корпус butterfly; 2 – активный элемент; 3 – элемент Пельтье; 4 – терморезистор; 5 – оптические волокна; 6 – микролинзы; 7 – кольцевой волоконный резонатор; 8 – вывод ответвителя; 9 – оптические коннекторы; 10 – ответвитель

Fig. 1. SRL scheme: 1 – butterfly housing; 2 – active element; 3 – Peltier element; 4 – thermistor; 5 – optical fibers; 6 – microlenses; 7 – ring fiber cavity; 8 – coupler output; 9 – optical connectors; 10 – coupler

ска 3 мкм. Для уменьшения обратных отражений передняя и задняя грани были скошены под углом 7° к активному волноводу, и на них были нанесены двухслойные просветляющие покрытия (Al_2O_3 и ZrO_2). Покрытия обеспечивают коэффициент отражения менее 0,05% (рис. 2). Мощность суперлюминисцентного излучения составляла 3–7 мВт при токах накачки 300 мА и спектральную ширину 30 нм и более.

Одними из основных трудностей создания ПКЛ являются сборка и проблема ввода излучения в одномодовый световод. Существуют разные способы согласования лазерного диода со световодом. В настоящей работе использовался способ согласования источника излучения с волокном с помощью микролинзы, сформированной на конце световода [1, 7]. Микролинзы могут изготавливать методами плавления и шлифовки.

Метод плавления основан на вытягивании волокна под действием электрической дуги и последующем оплавлении конца волокна для формирования радиуса линзы. Такой способ не позволяет создавать линзы очень маленького радиуса, поэтому максимальное значение коэффициента ввода излучения в световод составляет 40%.

Процедура шлифовки состоит из создания направляющих на конце волокна шлифовкой на грубом порошке (6–9 мкм) и полировки на мелком порошке (1–3 мкм) на ворсистой ткани для создания скругления на конце волокна. Изготовление контролируется с помощью спроецированного на экран изображения, выходящего из волокна через линзу лазерного излучения красного цвета. Такой метод позволяет получать цилиндрические линзы радиусом около 5 мкм (при угле между направляющими 90°). Известно, что геометрически излучающая область торца кристалла ПКЛ представляет собой прямоугольник с разме-

faces were beveled at an angle of 7° to the active waveguide, and two-layer antireflection coatings (Al_2O_3 and ZrO_2) were applied to them. Coatings provide a reflection coefficient of less than 0.05% (Fig. 2). The power of superluminescent radiation was 3–7 mW at a pump current of 300 mA and a spectral width of 30 nm or more.

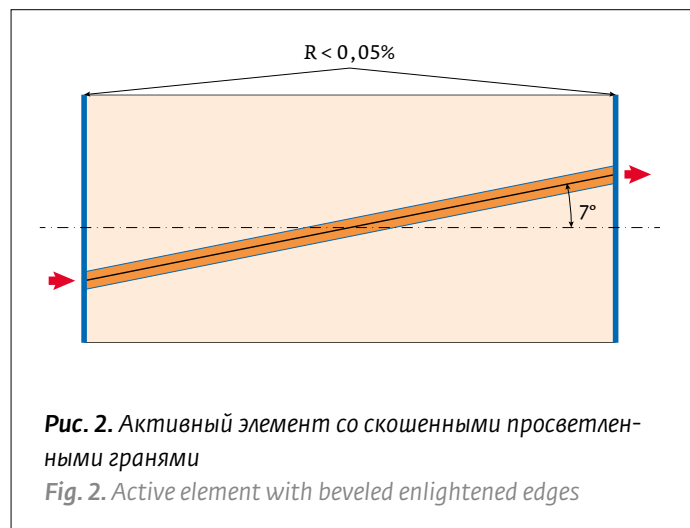
One of the main difficulties in creating a SRL is the assembly and the problem of introducing radiation into a single-mode fiber. There are different ways to match a laser diode to a fiber. In this work, we used a method of matching a radiation source with a fiber using a microlens formed at the end of a fiber [1, 7]. Microlenses can be made by melting and grinding.

The melting method is based on drawing the fiber under the action of an electric arc and then melting the end of the fiber to form the radius of the lens. This method does not allow you to create lenses with a very small radius, so the maximum value of the radiation input coefficient into the fiber is 40%.

The grinding procedure consists of creating guides at the end of the fiber by grinding on coarse powder (6–9 μm) and polishing on fine powder (1–3 μm) on a fleecy fabric to create a fillet at the end of the fiber. Production is controlled by a projected on-screen image of a red laser emitting from a fiber through a lens. This method allows you to get a cylindrical lens with a radius of about 5 microns (with an angle between the guides of 90°). It is known that the geometrically radiating region of the end face of the SRL crystal is a rectangle with dimensions of $3 \times 0.1 \mu\text{m}$. Therefore, the beam divergence angle in one plane is much larger than in the other and amounts to $40\text{--}45^\circ$. A polished cylindrical lens provides a radiation input coefficient of up to 80%. A fiber with a microlens was aligned on a three-coordinate table and fixed with solder on a micro-furnace (current-conducting board).

The SRL fiber leads are terminated by FC/APC optical connectors, which allow the module to dock with other elements of the optical system. In this case, the ends of the connector are ground at an angle of 7° , which reduces the amount of reflection from the fiber-air interface, thus suppressing undesirable feedback optical.

The type of fiber used as a cavity is also determined by the scope of the laser. For example, in gyroscopic applications it is necessary to use fiber with conservation of polarization, which ensures the greatest stability of the generation frequency of SRL in a resting state. In the SRL, an optical fiber of the Panda type was used (Fig. 3). This fiber is able to maintain linear polarization of radiation launched along one of its axes (fast or slow) with an extinction of more than 40 dB. The conserva-



рами $3 \times 0,1$ мкм. Поэтому угол расходимости пучка в одной плоскости значительно больше, чем в другой и составляет $40-45^\circ$. Шлифованная цилиндрическая линза обеспечивает коэффициент ввода излучения в волокно до 80%. Волокно с микролинзой юстировалось на трехкоординатном столике и закреплялось припоем на микропечке (плата, проводящая ток).

Волоконные выводы ПКЛ оконцовываются оптическими коннекторами FC/APC, которые позволяют производить стыковку модуля с остальными элементами оптической системы. При этом торцы коннектора отшлифованы под углом 7° , что снижает величину отражения от границы раздела волокно-воздух, подавляя таким образом нежелательную обратную оптическую связь.

Тип используемого в качестве резонатора волокна также определяется областью применения лазера. Например, в гироскопическом применении необходимо использовать волокно с сохранением поляризации, что обеспечивает наибольшую стабильность частоты генерации ПКЛ в покое состоянии. В ПКЛ использовалось оптическое волокно типа Panda (рис. 3). Данное волокно способно сохранять линейную поляризацию излучения, запущенного вдоль одной из его осей (быстрой или медленной) с экстинкцией более 40 дБ. Сохранение поляризации в таком волокне обусловлено наличием механических напряжений, вызванных специальными стержнями (см. рис. 3, позиция 2). Эти напряжения приводят к возникновению двулучепреломления вдоль сердцевины волокна.

Главным условием правильной юстировки и оконцовки является совмещение направления линейной поляризации и медленной оси волокна типа Panda. При стыковке активного элемента ПКЛ с волокном необходимо обеспечить такое расположение волокна, чтобы плоскость р-п перехода кристалла ПКЛ совмещалась с медленной осью волокна. При оконцовке коннекторами FC/APC необходимо совместить ключ коннектора с медленной осью волокна. В работе использовался пассивный метод ориентации волокна. Пассивный метод основан на геометрической ориентации оси РМ волокна с визуальной идентификацией позиции напрягающих элементов в поперечном разрезе волокна.

Вывод излучения для регистрации на фотоприемнике осуществляется с помощью волоконного направленного ответвителя. Коэффициент ответвления выбирается в зависимости от конкретного применения лазера. Для применения в гироскопе достаточно выводить 1-5% излучения. При использовании кольцевого лазера как источника излучения применяются большие коэффициенты ответвления. Оптиче-



tion of polarization in such a fiber is due to the presence of mechanical stresses caused by special rods (see Fig. 3, position 2). These stresses result in birefringence along the fiber core.

The main condition for proper alignment and termination is the combination of the direction of linear polarization and the slow axis of the Panda fiber. When docking the active element of the SRL with the fiber, the fiber must be positioned so that the plane p-n transition of the SRL crystal is aligned with the slow axis of the fiber. When terminating with FC/APC connectors, the connector key must be aligned with the slow axis of the fiber. In the work, a passive fiber orientation method was used. The passive method is based on the geometric orientation of the axis of the PM fiber with visual identification of the position of the tensioning elements in the transverse section of the fiber.

The output of radiation for registration at the photodetector is carried out using a fiber directional coupler. The branch coefficient is selected depending on the specific application of the laser. For use in a gyroscope, it is sufficient to derive 1-5% of the radiation. When using a ring laser as a radiation source, large branch coefficients are used. Optical fiber couplers are the waveguide equivalent of conventional optical translucent mirrors. Couplers are most often made either by polishing the sides or by welding. The optical couplers used in this work were made of single-mode fiber with preservation of polarization.



ские волоконные ответвители являются волноводным эквивалентом обычных оптических полупрозрачных зеркал. Ответвители чаще всего изготавливаются либо полировкой сторон, либо свариванием. Используемые в настоящей работе оптические ответвители были изготовлены из одномодового волокна с сохранением поляризации.

В качестве фотоприемника, на котором происходит интерференция и детектирование разностных частот оптического излучения, использовался фотоприемник на длину волны 1,55 мкм. Данный фотоприемник представлял собой PIN фотодиод на четверных соединениях InGaAs/InP, то есть на тех же соединениях, из которых изготавливается чип ПКЛ. Чувствительность фотодиода на длине волны 1,55 мкм составляла 0,9 А/Вт.

В процессе работы активный элемент ПКЛ, через который пропускаются токи 100–300 мА, сильно нагревается. Это приводит к снижению квантовой эффективности, разрушению волновода и изменению таких параметров, как центр линии усиления и коэффициент усиления. В связи с этим активный элемент помещается на охлаждающий элемент Пельтье. Элемент Пельтье вместе с встроенным в модуль терморезистором и внешней схемой стабилизации температуры поддерживает постоянную температуру кристалла с точностью 0,1 °С. В качестве источника тока накачки и схемы стабилизации использовался драйвер DLC-1300.

Было обнаружено, что ПКЛ, в зависимости от используемого волокна резонатора, может работать как в многомодовом, так и в одномодовом режимах. При использовании в качестве резонатора РМ волокна можно добиться одночастотного режима генерации. С РМ волокном в резонаторе существуют две взаимно перпендикулярные волны: одна, идущая по медленной оси, другая – по быстрой. Колебания в этих двух волнах приобретают некоторую разность фаз, а следовательно, соответствующую разность хода, определяемые выражением:

$$\delta = \frac{2\pi}{\lambda}(n_e - n_o)L,$$

где n_o и n_e – соответственно показатели преломления обыкновенного и необыкновенного лучей, L – длина волокна.

Вследствие взаимной перпендикулярности колебаний обыкновенная и необыкновенная волны не могут интерферировать между собой. При этом получается свет, поляризованный эллиптически. Если далее по выходе этих двух волн из кристаллической пластинки пропустить их через поляризатор, то устройство из каждой волны пропустит лишь те ком-

As a photodetector, on which interference and detection of difference frequencies of optical radiation occurs, a photodetector at a wavelength of 1.55 μm was used. This photodetector was a PIN photodiode on InGaAs/InP quadruples, that is, on the same compounds from which the SRL chip is made. The sensitivity of the photodiode at a wavelength of 1.55 μm was 0.9 A/W.

During operation, the active element of the SRL, through which currents of 100–300 mA are passed, is very hot. This leads to a decrease in quantum efficiency, the destruction of the waveguide and a change in parameters such as the center of the gain line and gain. In this regard, the active element is placed on the Peltier cooling element. Which, together with a thermistor built into the module and an external temperature stabilization circuit, allows you to maintain a constant crystal temperature with an accuracy of 0.1 °C. As a pump current source and stabilization circuit, the DLC-1300 driver was used.

It was found that SRL, depending on the cavity fiber used, can operate in both multimode and single-mode modes. When using fiber as a cavity, a single-frequency lasing regime can be achieved. There are two mutually perpendicular waves with a PM fiber in the cavity: one traveling along the slow axis, the other along the fast axis. The oscillations in these two waves acquire a certain phase difference, and, consequently, the corresponding difference in stroke, defined by the expression:

$$\delta = \frac{2\pi}{\lambda}(n_e - n_o)L,$$

where n_o and n_e are the refractive indices of the ordinary and extraordinary rays, respectively, L is the fiber length.

Due to the mutual perpendicularity of the oscillations, the ordinary and extraordinary waves cannot interfere with each other. This results in light polarized elliptically. If, after the exit of these two waves from the crystal plate, they are passed through the polarizer, then the device from each wave passes only those components that are polarized in one plane, i. e. distinguishes oscillations of one direction from both coherent waves. Next, the waves will interfere with each other depending on the difference in stroke obtained by them in the fiber. Therefore, the light intensity will depend on the phase difference acquired in the fiber by both waves. The role of the polarizer is played by the active element of the SOA, which enhances basically only one polarization.

The free spectral interval equal to the distance between adjacent maximums of the filter transmis-

поненты, которые поляризованы в одной плоскости, т.е. выделит из обеих когерентных волн колебания одного направления. Далее волны проинтерферируют между собой в зависимости от разности хода, полученной ими в волокне. Следовательно, интенсивность света будет зависеть от разности фаз, приобретенных в волокне обеими волнами. Роль поляризатора играет активный элемент ПОУ, усиливающий в основном только одну поляризацию.

Свободный спектральный интервал, равный расстоянию между соседними максимумами пропускания фильтра, зависит от длины волокна с сохранением поляризации:

$$\Delta\lambda = \frac{\lambda^2}{L(n_e - n_o)}.$$

На рис. 4 показан оптический спектр ПКЛ при длине волокна с сохранением поляризации величиной 1 м.

При такой длине волокна свободный спектральный интервал составляет 4,8 нм, и необходимое для генерации усиление обеспечивается только для одного максимума пропускания фильтра. Ширина линии излучения составляет 0,013 нм, что близко к разрешающей способности анализатора спектра. Частота генерации ПКЛ может плавно перестраиваться путем изменения тока накачки и температуры активного элемента лазера [8].

РЕЗУЛЬТАТЫ

Одним из важнейших измерительных приборов, определяющих уровень развития навигационной техники летательных аппаратов различного назначения, являются датчики вращения. В настоящее время существуют как датчики вращения, основанные на микроэлектромеханических системах, так и датчики, не имеющие подвижных частей: волоконно-оптические гироскопы и гироскопы на газовых кольцевых лазерах, основанные на эффекте Саньяка [1]. Проблемы создания датчика вращения на основе полупроводникового кольцевого лазера (ПКЛ) пока находится в стадии решения [9]. Потенциал такого датчика вращения обещает снижение массогабаритных характеристик и стоимости, простоту изготовления, и, возможно, снижение чувствительности к другим, отличным от вращения воздействиям.

На рис. 5 представлены ватт-амперные характеристики ПОУ (на выходе одного из волоконных выводов ПОУ до замыкания кольца) (рис. 5а) и ПКЛ (на выходе ответвителя) (рис. 5б) на длину волны 1550 нм. Мощность суперлюминесцентного излучения ПОУ составляла 3,3 мВт при токе накачки 250 мА. В режиме замыкания кольца пороговый ток генерации ПКЛ составил

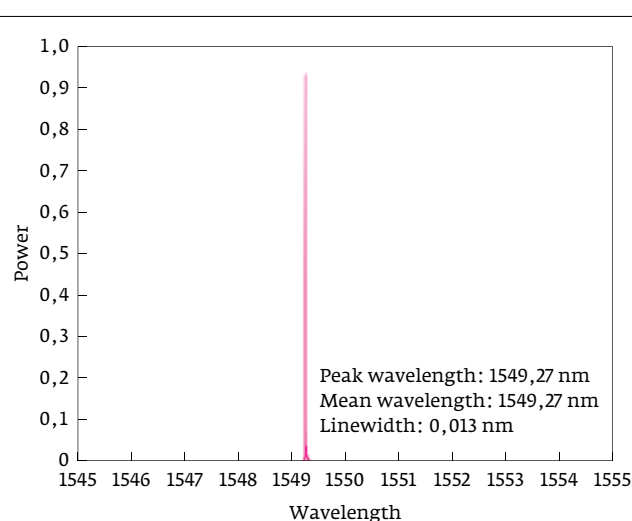


Рис. 4. Оптический спектр ПКЛ, созданного с использованием волокна с сохранением поляризации длиной 1 м

Fig. 4. Optical spectrum of SRL created using fiber with conservation of polarization 1 m long

sion depends on the fiber length while maintaining the polarization:

$$\Delta\lambda = \frac{\lambda^2}{L(n_e - n_o)}.$$

Figure 4 shows the optical spectrum of SRLs with a fiber length while maintaining a polarization of 1 m.

With such a fiber length, the free spectral range is 4.8 nm, and the gain required for generation is provided for only one maximum transmission filter. The emission line width is 0.013 nm, which is close to the resolution of the spectrum analyzer. The SRL generation frequency can be smoothly tuned by changing the pump current and the temperature of the active element of the laser [8].

RESULTS

One of the most important measuring instruments that determine the level of development of the navigation technology of aircraft for various purposes are rotation sensors. Currently, there are both rotation sensors based on microelectromechanical systems, and sensors that do not have moving parts: fiber-optic gyroscopes and gyroscopes based on gas ring lasers based on the Sagnac effect [1]. The problems of creating a rotation sensor based on a semiconductor ring laser (SRL) are still being solved [9]. The potential of such a rotation sensor promises a decrease in weight and size characteristics and cost, ease of manufacture, and, possibly, a decrease in sensitivity to other influences other than rotation.

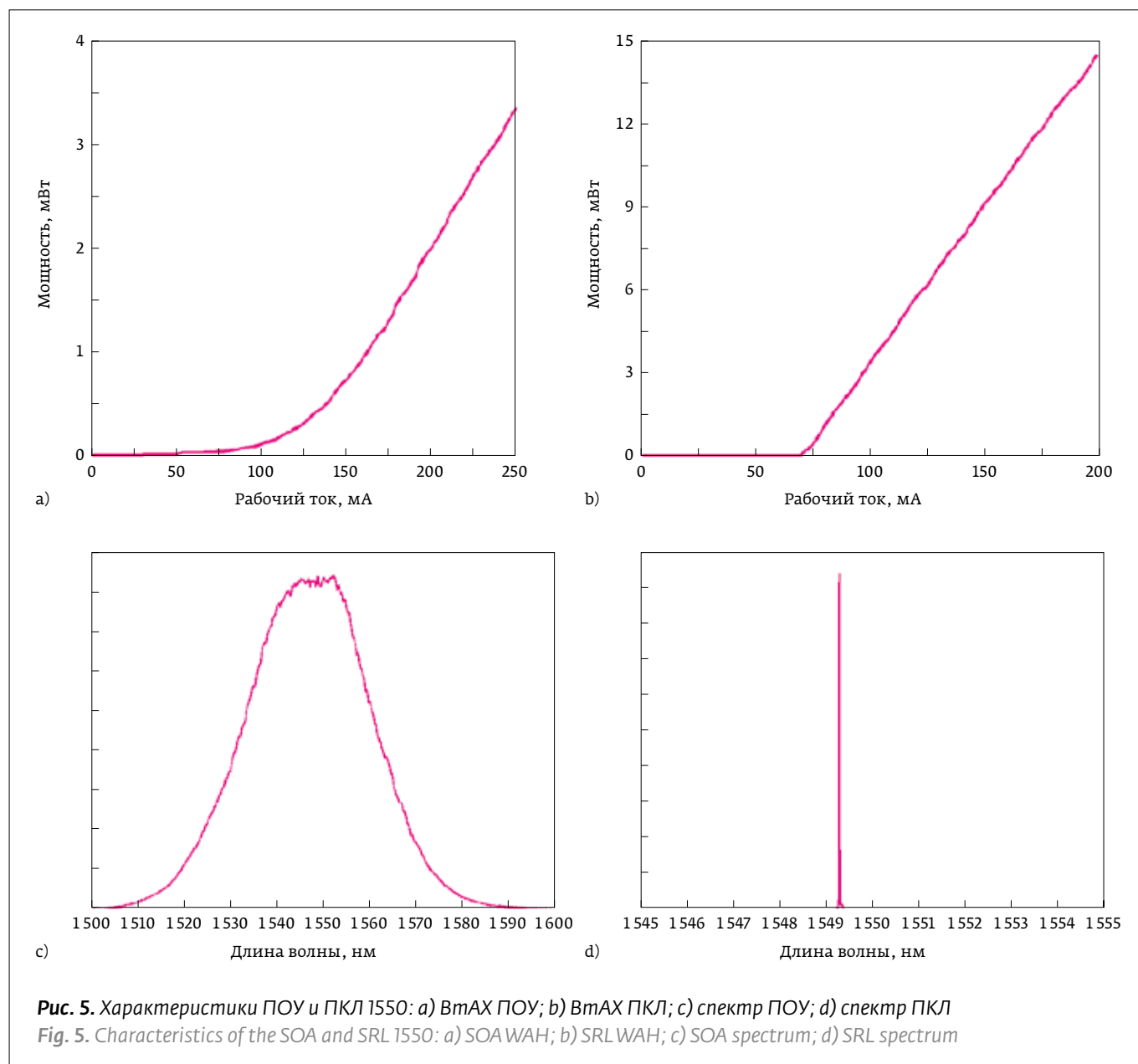
65 мА, а мощность излучения при токе накачки 200 мА составила 15 мВт, что говорит о том, что ПКЛ работает в режиме генерации.

На оптическом анализаторе спектра «ANDO» измерены оптические спектры излучения ПКЛ до (рис. 5с) и после замыкания кольца (рис. 5д). Спектр сверхлюминесцентного излучения (до замыкания кольца) имел полуширину линии излучения 35 нм на длине волны 1548 нм, в то время как спектр генерации ПКЛ имел полуширину линии, менее 0,02 нм на длине волны 1549,2 нм.

Так как длина резонатора ПКЛ обычно составляет от 3,5 метров и более, отсюда следует, что частотный интервал между соседними модами составляет

In fig. Figure 5 shows the current-voltage characteristics of the SOA (at the output of one of the fiber terminals of the SOA before the ring closes) (Fig. 5a) and SRL (at the output of the coupler) (Fig. 5b) at a wavelength of 1550 nm. The power of the superluminescent radiation of the SOA was 3.3 mW at a pump current of 250 mA. In the ring closure mode, the threshold SRL generation current was 65 mA, and the radiation power at a pump current of 200 mA was 15 mW, which means that the SRL operates in the generation mode.

The optical spectrum analyzer «ANDO» measured the optical emission spectra of SRLs before (Fig. 5c) and after ring closure (Fig. 5d). The superluminescent emission spectrum (before ring closure) had a half-width of the



60 МГц и менее. Ясно, что не существует такого оптического анализатора спектра, который мог бы разрешить моды с таким малым расстоянием между ними. Поэтому оптические спектры, которые приведены выше, являются по сути огибающими реального спектра ПКЛ. Наблюдение продольных мод полупроводникового кольцевого лазера возможно при использовании методики спектрального анализа радиочастотного сигнала с фотоприемника.

На рис. 6 показана схема установки для измерения отклика ПКЛ на вращение. Резонатор ПКЛ имел радиус 15 см и длину 800 м. Направленный ответвитель 1 использовался для вывода части излучения встречных волн из резонатора. Две встречные волны интерферировали в ответвителе 2 и поступали на фотоприемник. Сигнал с фотоприемника подавался на радиочастотный анализатор спектра GW-Instek 7830. ПКЛ был помещен на вращающийся стол. Стол позволяет производить вращение с угловыми скоростями в диапазоне 0–1000 град/сек. В проводимых исследованиях максимальная скорость вращения достигала 180 град/сек. Съем информации происходит через скользящие контакты, встроенные во вращающийся стол. К скользящим контактам был подключен радиочастотный анализатор спектра. Как известно, кольцевой резонатор лазера чувствитель-

ен emission line of 35 nm at a wavelength of 1548 nm, while the SRL generation spectrum had a half-width of the line of less than 0.02 nm at a wavelength of 1549.2 nm.

Since the SRL cavity length is usually from 3.5 meters or more, it follows that the frequency interval between adjacent modes is 60 MHz or less. It is clear that there is no such optical spectrum analyzer that could resolve modes with such a small distance between them. Therefore, the optical spectra that are presented above are essentially envelopes of the real SRL spectrum. The longitudinal modes of a semiconductor ring laser can be observed using the method of spectral analysis of a radio frequency signal from a photodetector.

Fig. 6 shows a setup diagram for measuring the response of a SRL to rotation. The SRL cavity had a radius of 15 cm and a length of 800 m. Directional coupler 1 was used to output part of the radiation of counterpropagating waves from the cavity. Two counterpropagating waves interfered in coupler 2 and entered the photodetector. The signal from the photodetector was fed to the GW-Instek 7830 radio frequency spectrum analyzer. The SRL was placed on a rotating table. The table allows rotation with angular velocities in the range of 0–1000 deg/s. In the ongoing studies, the maximum rotation speed reached 180 deg/s. Information is acquired through sliding contacts built into the rotating table.


www.nolatech.ru

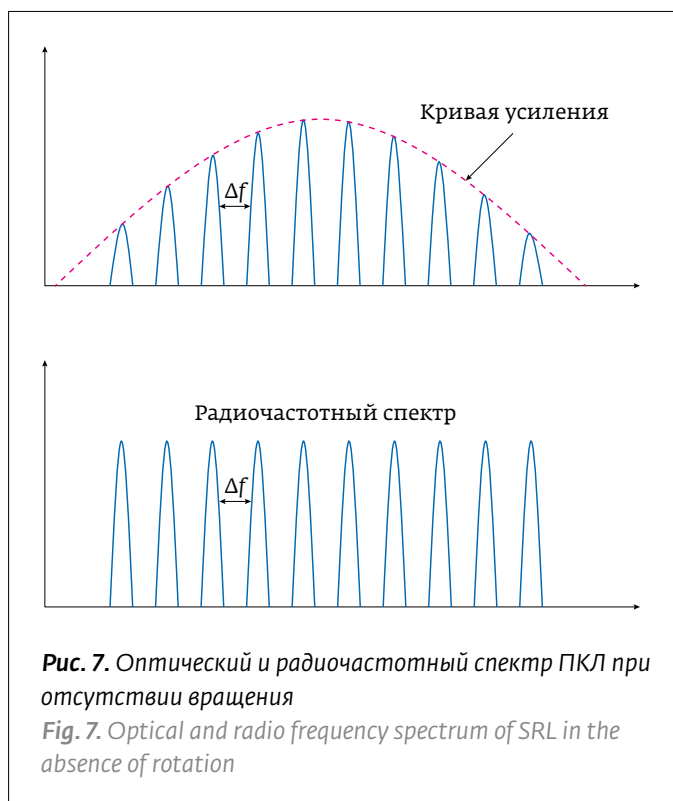
АО «НОЛАТЕХ» — разрабатывает и изготавливает полупроводниковые лазеры (в том числе одночастотные и перестраиваемые с волоконно-брегговской решеткой или DFB), суперлюминесцентные диоды, полупроводниковые оптические усилители, фотоприемники, драйверы лазерных модулей. Длины волн от 400 до 1650 нм. Предприятие организовано в 1992 году.

ПРОДУКЦИЯ

- Лазерные диоды и модули
- Лазеры со стабилизацией длины волны
- Одночастотные лазерные модули
- Перестраиваемые лазерные модули DFB лазеры
- Суперлюминесцентные диоды
- Полупроводниковые оптические усилители
- Фотодиодные модули
- Компактные лазерные модули
- Драйверы лазерных диодов



nolatech@mail.ru
+7(495)333-93-01
+7(495)335-32-25



лен к невзаимности, поскольку вследствие эффекта Саньяка частоты встречных волн в отсутствие захвата расщепляются. Вследствие наличия весьма значительного рассеяния в активном элементе ПКЛ следует ожидать большой области захвата частот встречных волн, что и было обнаружено: она составила величину 1 град/с.

На рис. 7 представлен оптический и радиочастотный спектр сигнала с фотоприемника, регистрирующего излучение неподвижного ПКЛ, для которого оптические частоты встречных волн совпадают. Фотоприемник обладает квадратичной нелинейностью и выделяет спектр биений большого числа оптических мод, попадающий в радиочастотный диапазон. Расстояние между оптическими модами при длине кольцевого резонатора ПКЛ $L=800$ м равна 255 кГц, а ширина линии составляет 3 кГц.

Одночастотные полупроводниковые перестраиваемые кольцевые лазеры особенно востребованы в спектроскопии и газовом зондировании, где узкая линия генерации лазера сканирует отдельные линии поглощения газа с очень высоким разрешением (рис. 8). Узкая ширина линии излучения позволяет полностью разрешить отдельные линии поглощения газа (с типичной шириной линий в несколько ГГц при атмосферном давлении) [4]. Измерение проводится путем сравнения центрального пика поглощения с нулевым уровнем по обе стороны линии.

A radio frequency spectrum analyzer was connected to the sliding contacts. As is known, a laser ring cavity is sensitive to nonreciprocity, because, due to the Sagnac effect, the frequencies of counterpropagating waves are split in the absence of capture. Due to the presence of very significant scattering in the active element of the SRL, one should expect a large region of capture of the frequencies of counterpropagating waves, which was found to be 1 deg/s.

Figure 7 shows the optical and radio-frequency spectrum of a signal from a photodetector recording the radiation of a stationary SRL, for which the optical frequencies of the opposing waves coincide. The photodetector has a quadratic nonlinearity and distinguishes the beat spectrum of a large number of optical modes falling into the radio frequency range. The distance between the optical modes with a SRL ring cavity length $L=800$ m is 255 kHz, and the line width is 3 kHz.

Single-frequency semiconductor tunable ring lasers are especially in demand in spectroscopy and gas sensing, where a narrow laser generation line scans individual gas absorption lines with a very high resolution (Fig. 8). A narrow emission line width allows one to completely resolve individual gas absorption lines (with a typical line width of several GHz at atmospheric pressure) [4]. The measurement is carried out by comparing the central absorption peak with a zero level on both sides of the line.

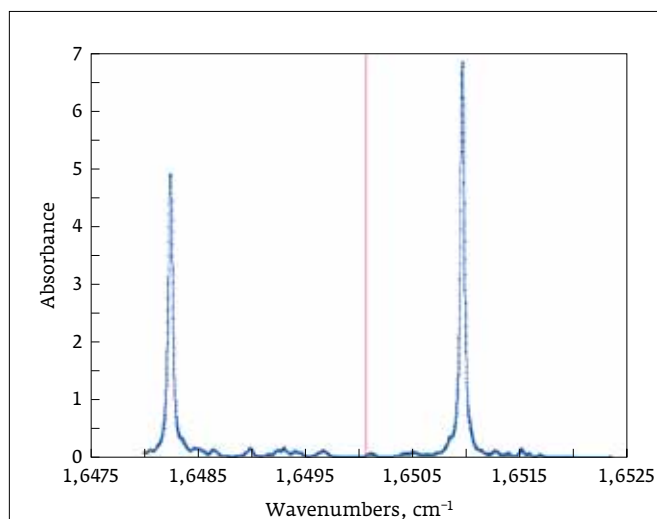


Рис. 8. Спектры поглощения газа CH_4

Fig. 8. Absorption spectra of CH_4 gas

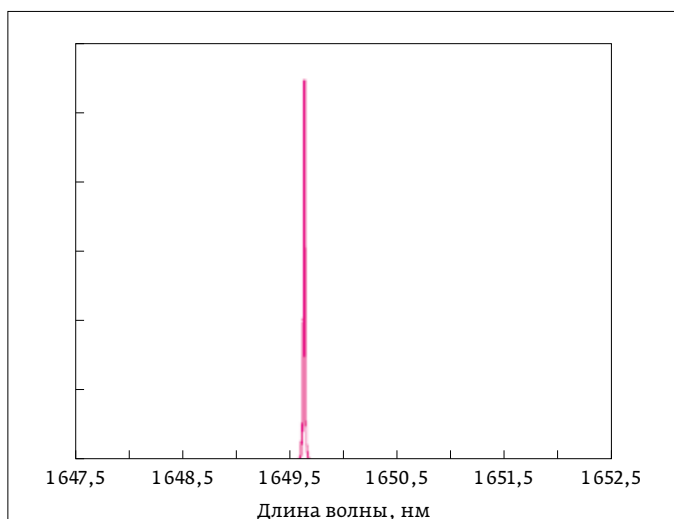


Рис. 9. Спектральная характеристика ПКЛ 1650

Fig. 9. Spectral characteristic of PKL 1650

Ниже приведена спектральная характеристика ПКЛ на длину волны 1650 нм (рис. 9). В режиме замыкания кольца пороговый ток генерации ПКЛ составил 60 мА, а мощность излучения при токе накачки 180 мА составила 8 мВт. Спектр генерации ПКЛ имел полуширину линии менее 0,02 нм на длине волны 1649,6 нм.

Below is the spectral characteristic of SRLs at a wavelength of 1650 nm (Fig. 9). In the ring closure mode, the threshold SRL generation current was 60 mA, and the radiation power at a pump current of 180 mA was 8 mW. The SRL generation spectrum had a line half-width of less than 0.02 nm at a wavelength of 1649.6 nm.

ЭССЕНТОПТИКС ||| ESSENTOPTICS

PHOTON RT

Спектрофотометр для Оптиков | Spectrophotometer for Coaters

185 – 5200 нм



МЫ **ДЕЙСТВИТЕЛЬНО** РЕШАЕМ СЛОЖНЫЕ
ЗАДАЧИ НАШИХ КЛИЕНТОВ

—
WE **TRULY** FULFILL THE MOST
CHALLENGING CUSTOMER'S NEEDS

ООО «ЭссентОптикс»

23а-81, ул. 40 лет Победы, Боровляны, Минская обл., Минский р-н, 223053 Беларусь
Тел.: +375-17-5112025 | Факс: +375-17-5112026 | www.essentoptics.com



ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, в работе представлены перестраиваемые одночастотные полупроводниковые кольцевые лазеры с волоконным резонатором с сохранением поляризации на длине волны 1550 и 1650 нм. Исследуемые в работе лазеры имели мощность излучения на выходе волокна в пределах от 8 до 15 мВт. Длина резонатора представленных кольцевых лазеров менялась от нескольких миллиметров до сотен метров. Ширина линии излучения кольцевого лазера с длиной волны 1550 нм при длине волоконного резонатора 800 метров, имела 3 кГц. ПКЛ обладают большим набором свойств, которые позволяют находить всё новые и новые применения в практических целях. В работе показана возможность применения ПКЛ на длине волны 1650 нм для диодной лазерной спектроскопии (ДЛС) и на длине волны 1550 нм для гироскопии.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Патент RU41924. Кольцевой лазер / Дуряев В. П., Неделин Е. Т., Недобывайло Т. П., Сумароков М. А.
2. Патент RU119938. Суперлюминесцентный излучатель / Акпаров В. В., Дуряев В. П., Неделин Е. Т., Недобывайло Т. П., Сумароков М. А.
3. Дуряев В. П., Медведев С. В., Воронченко С. А. Оптоэлектронные компоненты для цифровых информационных систем. *Фотон-экспресс*. 2019; 3(155); 2–5.
4. Lynch S. G. et al. Bragg-grating-stabilized external cavity lasers for gas sensing using tunable diode laser spectroscopy. *Novel In-Plane Semiconductor Lasers XIII. – International Society for Optics and Photonics*. 2014; 9002: 900209. DOI: 10.1117/12.2039971.
5. Дуряев В. П., Медведев С. В. Полупроводниковый лазер с кольцевым волоконным резонатором. *Квантовая электроника*. 2013; 43(10): 914–916.
6. Акпаров В. В., Дмитриев В. Г., Дуряев В. П., Казаков А. А. Полупроводниковый кольцевой лазер и исследование его характеристик в режиме датчика вращения. *Квантовая электроника*. 2010; 40(10): 851–854.
7. Дуряев В. П., Медведев С. В. Физико-математический модель полупроводникового оптического усилителя. *Обзорные прикладной и промышленной математики*. 2019; 26(2): 105–118.
8. Chen H. Dynamics of widely tunable single-frequency semiconductor fiber ring laser. *Physics Letters A*. 2004; 320 (5–6): 333–337. DOI: 10.1016/j.physleta.2003.11.038.
9. Сахаров В. К. Модель лазерного гироскопа с частотной подставкой. *Квантовая электроника*. 2016; 46(6): 567–573.

АВТОРЫ

Дуряев В. П., д. т. н., АО «Новая лазерная техника», nolatech@mail.ru, <http://nolatech.ru>, Москва, Россия.
ORCID: 0000-0002-2701-0335
Медведев С. В., к. т. н., АО «Новая лазерная техника», nolatech@mail.ru, <http://nolatech.ru>, Москва, Россия.
ORCID: 0000-0001-6289-3228;
Воронченко С. А., АО «Новая лазерная техника», nolatech@mail.ru, <http://nolatech.ru>, Москва, Россия.
ORCID: 0000-0002-3913-1097

ВКЛАД ЧЛЕНОВ АВТОРСКОГО КОЛЛЕКТИВА

Статья подготовлена на основе многолетней работы всех членов авторского коллектива.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов. Все авторы приняли участие в написании статьи и дополнили рукопись в части своей работы.

CONCLUSION

Thus, tunable single-frequency semiconductor ring lasers with a fiber cavity with conservation of polarization at the wavelengths of 1550 and 1650 nm are presented in this work. The lasers studied in the work had a radiation output power of the fiber in the range from 8 to 15 mW. The cavity length of the presented ring lasers varied from a few millimeters to hundreds of meters. The radiation line width of a ring laser with a wavelength of 1550 nm and a fiber cavity length of 800 meters was 3 kHz. SRLs have a large set of properties that allow you to find more and more new applications for practical purposes. The possibility of using SRLs at a wavelength of 1650 nm for diode laser spectroscopy (DLS) and at a wavelength of 1550 nm for gyroscopy is shown.

REFERENCES

1. Patent RU41924. Kol'tsevoj lazer / Duraev V. P., Nedelin E. T., Nedobyvajlo T. P., Sumarokov M. A.
2. Patent RU119938. Superlyuminescentnyj izluchatel' / Akparov V. V., Duraev V. P., Nedelin E. T., Nedobyvajlo T. P., Sumarokov M. A.
3. Duraev V. P., Medvedev S. V., Voronchenko S. A. Optoelektronnye komponenty dlya cifrovyyh informacionnyh sistem. *Foton-ekspress*. 2019; 3(155); 2–5.
4. Lynch S. G. et al. Bragg-grating-stabilized external cavity lasers for gas sensing using tunable diode laser spectroscopy. *Novel In-Plane Semiconductor Lasers XIII. – International Society for Optics and Photonics*. 2014; 9002: 900209. DOI: 10.1117/12.2039971.
5. Duraev V. P., Medvedev S. V. Fibre ring cavity semiconductor laser. *Quantum Electronics*. 2013; 43(10): 914–916.
6. Akparov V. V., Dmitriev V. G., Duraev V. P., Kazakov A. A. A semiconductor ring laser: study of its characteristics as a rotation sensor. *Quantum Electronics*. 2010; 40(10): 851–854.
7. Duraev V. P., Medvedev S. V. Fiziko-matematicheskij model' poluprovodnikovogo opticheskogo usilitelya. *Obozrenie prikladnoj i promyshlennoj matematiki*. 2019; 26(2): 105–118.
8. Chen H. Dynamics of widely tunable single-frequency semiconductor fiber ring laser. *Physics Letters A*. 2004; 320 (5–6): 333–337. DOI: 10.1016/j.physleta.2003.11.038.
9. Sakharov V. K. Model of a laser gyroscope with frequency dithering. *Quantum Electronics*. 2016; 46(6): 567–573.

ABOUT AUTHORS

Duraev V. P., Doctor of Technical Sciences, JSC "New Laser Technology", nolatech@mail.ru, <http://nolatech.ru>, Moscow, Russia.
ORCID: 0000-0002-2701-0335
Medvedev S. V., Cand. of Technical Sciences, JSC "New Laser Technology", nolatech@mail.ru, <http://nolatech.ru>, Moscow, Russia.
ORCID: 0000-0001-6289-3228
Voronchenko S. A., JSC "New Laser Technology", nolatech@mail.ru, <http://nolatech.ru>, Moscow, Russia.
ORCID: 0000-0002-3913-1097

CONTRIBUTION BY THE MEMBERS OF THE TEAM OF AUTHORS

The article was prepared on the basis of many years of work by all members of the team of authors.

CONFLICT OF INTEREST

The authors claim that they have no conflict of interest. All authors took part in writing the article and supplemented the manuscript in part of their work.



VII ТРОИЦКАЯ КОНФЕРЕНЦИЯ С МЕЖДУНАРОДНЫМ УЧАСТИЕМ «МЕДИЦИНСКАЯ ФИЗИКА» (ТКМФ-7)

Запланированная на июнь **VII Троицкая конференция «Медицинская физика»**, перенесена на вторую половину года в связи с развитием COVID-19. Конференция пройдет **19-21 октября 2020 года** в формате **онлайн**.

Институты Троицка исторически активно участвуют в фундаментальных и прикладных исследованиях в области медицинской физики. Поэтому идея регулярного, раз в два года, проведения научных встреч, на которых собираются не только физики, но и специалисты из медицинских учреждений, получила поддержку, а Первая Троицкая научная конференция состоялась в 2004 году.

Организаторами конференции традиционно выступают Институт фотонных технологий ФНИЦ «Кристаллография и фотоника» РАН (бывший ИПЛИТ РАН), Институт спектроскопии РАН и Администрация г. Троицка, при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований.

В 2020 году тематические секции ТКМФ-7 будут затрагивать широкий круг вопросов из области биомедицинской фотоники, нанотехнологий для медицины, новых биомедицинских методов, приборов и материалов, регенеративных технологий и тканевой инженерии, ядерной и лучевой диагностики и терапии. В рамках конференции будут проведены Симпозиум по ЯМР томографии, Молодёжная научная школа по медицинской физике, конкурс докладов молодых учёных, а также выставка «Научная и медицинская техника и материалы». К участию в конференции с пленарными и секционными докладами приглашены известные российские и зарубежные ученые из США, Великобритании, Германии, Китая и др.

К участию в конференции приглашаются специалисты в области биомедицины, нанотехнологий, регенеративных технологий и тканевой инженерии, а также практикующие врачи, использующие в своей работе методы и результаты исследований в сфере медицинской физики.

ОРГАНИЗАТОРЫ КОНФЕРЕНЦИИ

- Институт фотонных технологий ФНИЦ «Кристаллография и фотоника» РАН
- Институт спектроскопии РАН (ИСАН)
- Троицкий научный центр РАН
- Администрация г. Троицка
- Троицкий инновационный кластер

ТЕМАТИЧЕСКИЕ СЕКЦИИ КОНФЕРЕНЦИИ

- Биомедицинская фотоника
- Нанотехнологии для медицины
- Новые биомедицинские методы, приборы и материалы
- Регенеративные технологии, тканевая инженерия
- Ядерная и лучевая диагностика и терапия

Более подробно ознакомиться с тематикой конференции и условиями участия можно на сайте www.medphys.troitsk.ru

Будем рады видеть Вас среди участников конференции!